



PROPOSTA DE MONITORAMENTO E MANEJO DA SOLUÇÃO NUTRITIVA APLICADA A HIDROPONIA PROPOSAL FOR MONITORING AND MANAGEMENT OF NUTRITIONAL SOLUTIONS APPLIED TO HYDROPONICS

Me. André Luiz de Souza Rocha ¹

Prof.^a. Dra. Lilian Maria Tosta Simplício Rodrigues²

Prof. Dr. Edvaldo Pereira Queiroz Júnior ³

Resumo

Este artigo apresenta uma nova abordagem de monitoramento e gerenciamento da solução nutritiva em sistemas hidropônicos, com a integração de sensores eletrônicos e inteligência artificial (IA), contrastando-a com os métodos tradicionais. O objetivo é destacar as melhorias, tais como o aumento da produtividade, ganhos nutricionais e redução dos custos de produção com fertilizantes e desperdícios de recursos.

Nos sistemas convencionais de hidroponia, o monitoramento envolve checagens periódicas dos parâmetros físico-químicos da solução, como Potencial Hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (EC), oxigênio dissolvido (DO), total de sólidos dissolvidos (TDS), temperatura e salinidade. Ajustes são normalmente feitos adicionando substâncias para corrigir desequilíbrios, como ácidos ou bases para o pH, ou sais para a EC. Entretanto, a referida correção é feita de forma equivocada, agregando substâncias à solução nutritiva, tratando sempre a consequência do desequilíbrio e não as suas causas. O modelo proposto coleta os mesmos parâmetros, mas esses são utilizados como entradas em um modelo de aprendizado de máquina, treinado por uma grande quantidade de resultados de ensaios laboratoriais de amostras de soluções nutritivas, que devolvem como saída, a estimativa das concentrações de macro e micro nutrientes presentes na solução com uma margem de erro aceitável.

Os resultados preliminares mostram que esse método melhora a eficiência dos nutrientes, reduz custos com fertilizantes e aumenta a produtividade e qualidade nutricional das plantas. A implementação desse modelo pode significar um avanço na agricultura de precisão, levando a sistemas mais eficazes, sustentáveis e adaptados às necessidades nutricionais das plantas.

Palavras-chave: Hidroponia, monitoramento, manejo, solução nutritiva, Inteligência Artificial.

¹ Discente do Programa de Pós-Graduação em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para Inovação (PROFNIT/UFBA) e-mail: rocha.a@ufba.br

² Docente do Curso Superior de Química do Instituto de Química *Campus* Ondina. Doutora em Química pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). e-mail: lilian.simplicio@gmail.com

³ Docente do Curso Superior de Química do Instituto de Química *Campus* Ondina. Doutor em Química pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). e-mail: aldo130263@gmail.com

Abstract

This article presents a new approach for monitoring and managing nutrient solutions in hydroponic systems, integrating electronic sensors and artificial intelligence (AI) and contrasting it with traditional methods. The objective is to highlight improvements, such as increased productivity, nutritional gains and reduced production costs related to fertilizers and waste of resources.

In conventional hydroponic systems, monitoring involves periodic checks of the physicochemical parameters of the solution, such as hydrogen ion potential (pH), electrical conductivity (EC), dissolved oxygen (DO), total dissolved solids (TDS), temperature and salinity . Adjustments are typically made by adding substances to correct imbalances, such as acids or bases for pH, or salts for EC. However, this correction is often done incorrectly, adding substances to the nutrient solution and addressing the consequences of the imbalance rather than its causes.

The proposed model collects the same parameters, but they are used as inputs in a machine learning model trained with a large number of laboratory test results of nutrient solution samples. The model produces estimates of the concentrations of macro and micronutrients present in the solution with an acceptable margin of error.

Preliminary results show that this method improves nutrient efficiency, reduces fertilizer costs and increases plant productivity and nutritional quality. The implementation of this model could mean an advance in precision agriculture, leading to more effective and sustainable systems, adapted to the nutritional needs of plants.

Keywords: Hydroponics, monitoring, management, nutrient solution, Artificial Intelligence.

1 INTRODUÇÃO

A produção de alimentos é uma das atividades mais importantes para a humanidade, e a hidroponia é uma técnica que tem ganhado cada vez mais espaço na produção vegetal. O sistema hidropônico de produção consiste em cultivar plantas sem solo, utilizando soluções nutritivas em água. Essa técnica permite um maior controle sobre o ambiente de cultivo, resultando em maior produtividade, sustentabilidade e qualidade dos alimentos produzidos, como uma alternativa sustentável e rentável de produção, permitindo o cultivo de plantas em ambientes controlados, com menor uso de água e fertilizantes (GUEDES, 2020).

O monitoramento das soluções nutritivas aplicadas à hidroponia ainda é um desafio para os produtores. É necessário um acompanhamento constante dos nutrientes presentes na solução para garantir que as plantas estejam recebendo todos os nutrientes necessários para um crescimento saudável. Além disso, a falta ou excesso de nutrientes pode levar a problemas como doenças nas plantas e/ou perda de produtividade (MALAVOLTA et. al., 1997).

Em todos os diferentes tipos de sistemas hidropônicos, o manejo efetuado para a correção da solução nutritiva requer o monitoramento constante dos *fatores externos* (pH, EC, OD, TDS, temperatura etc.) (FURLANI, 1997). Entretanto, a referida correção desses fatores é feita de forma equivocada, agregando substâncias à solução nutritiva, tratando sempre a consequência do desequilíbrio e não as suas causas. Este equivoco se dá, em parte, pela inviabilidade prática de se efetuar análises laboratoriais da solução nutritiva de baixo custo e em tempo hábil.

Nesse contexto, apresento esta proposta de controle da solução nutritiva, utilizando os mais novos recursos tecnológicos disponíveis, como sensores eletrônicos de monitoramento, microcontroladores ligados à rede Wifi (IOT) e software com Inteligência Artificial alimentado com uma série histórica contendo diversos resultados de análises laboratoriais de soluções nutritivas, capaz de prever os valores dos nutrientes em tempo real (o que não é possível utilizando-se outros métodos analíticos volumétricos/espectrométricos), nos permitindo quantificar as diversas substâncias diluídas em uma solução e verificar suas carências ou excessos, com uma margem de precisão aceitável, levando em conta não somente os fatores externos, que são consequências das variações físico-químicas, mas as quantidades específicas de cada nutriente presente na solução nutritiva.

O objetivo geral foi desenvolver um método de controle da solução nutritiva para o cultivo hidropônico, baseado em algoritmos de Inteligência Artificial (IA), adequando as reposições de micro e macro nutrientes e manutenção dos fatores externos, às necessidades nutricionais reais das plantas, de forma gradativa e racional, visando a diminuição dos custos de produção, ganhos de produtividade nutricionais, visando de forma específica:

- ✓ Mensurar a influência do método de produção proposto, quanto aos ganhos de produtividade (massa verde produzida/m²), quando comparado aos métodos convencionais de produção;
- ✓ Analisar a influência da utilização das substâncias nutritivas em detrimento dos formulados comerciais e o impacto gerado nos custos de produção com fertilizantes;
- ✓ Comparar a influência dos ganhos nutricionais obtidos pelo método de produção proposto aos métodos convencionais de produção;
- ✓ Avaliar os resultados fornecidos pela IA comparando-os aos resultados das análises laboratoriais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Estado da arte

A hidroponia tem sido cada vez mais utilizada no Brasil nas últimas décadas, especialmente em áreas urbanas onde o espaço para a agricultura tradicional é limitado. Embora a hidroponia tenha sido desenvolvida como método de produção agrícola na década de 1930, a sua aplicação no Brasil teve início no final da década de 80 (GUEDES, 2020).

O Estado da Arte da hidroponia no Brasil mostra que o país tem grande potencial para o desenvolvimento dessa técnica de cultivo, sendo utilizada para a produção de hortaliças, plantas ornamentais, cereais, plantas medicinais e exóticas, com destaque para a produção em ambientes controlados como estufas, em diversas regiões do país, principalmente em São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (ANUÁRIO, 2018).

Algumas das tendências e práticas atuais incluem:

1. Uso de tecnologias sustentáveis: Muitas fazendas hidropônicas no Brasil estão adotando tecnologias sustentáveis, como fontes de energia renováveis e técnicas de conservação de água, chegando a economizar 95% de água quando comparada ao cultivo tradicional em solo;
2. Agricultura vertical: Devido à falta de espaço nas áreas urbanas, muitas fazendas hidropônicas no Brasil estão implementando técnicas de agricultura vertical para maximizar o uso do espaço disponível;
3. Uso de automação: As fazendas hidropônicas estão usando cada vez mais a automação para otimizar o crescimento das culturas e reduzir os custos. As tecnologias de automação incluem sensores, robótica e inteligência artificial;
4. Manejo de nutrientes: o manejo de nutrientes é um aspecto crítico da agricultura hidropônica e, no Brasil, os agricultores estão usando técnicas avançadas para otimizar o fornecimento de nutrientes às plantas. Isso inclui o uso de sensores de pH, soluções nutritivas e técnicas avançadas de fertilização;
5. Crescimento do mercado: O mercado hidropônico no Brasil está crescendo rapidamente, e muitas novas empresas e empresas estabelecidas estão investindo na agricultura hidropônica. Isso levou a um aumento das atividades de pesquisa e desenvolvimento, bem como à adoção de novas tecnologias e melhores práticas;
6. Pesquisa e desenvolvimento: As atividades de pesquisa e desenvolvimento em hidroponia estão aumentando no Brasil, com muitas universidades e institutos de pesquisa

focados em melhorar o rendimento da produção, desenvolver novas variedades de culturas e otimizar sistemas hidropônicos.

Apesar desses desafios, o Estado da Arte da hidroponia no Brasil mostra um grande potencial para o desenvolvimento da técnica de cultivo e a sua utilização como uma alternativa sustentável e rentável para a produção de alimentos no país. No geral, a hidroponia está avançando rapidamente, impulsionado pela necessidade de agricultura sustentável, a crescente demanda por produtos frescos em áreas urbanas e a crescente disponibilidade de novas tecnologias e pesquisas.

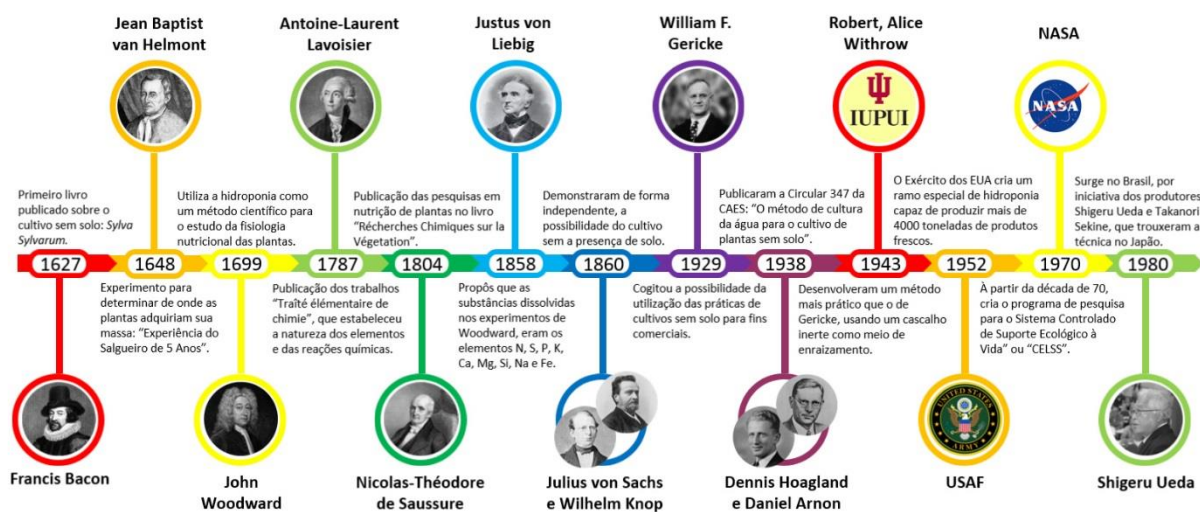
No entanto, a hidroponia ainda enfrenta desafios no Brasil, como a falta de investimentos em pesquisa e desenvolvimento, o alto custo dos equipamentos e insumos, a falta de capacitação dos produtores, além de questões regulatórias.

2.2 Estado da técnica

2.2.1 Conceito de hidroponia

A hidroponia é um termo aplicado a um método especializado, que abrange um conjunto de técnicas utilizadas no cultivo de plantas em uma solução livre de solo, onde os nutrientes minerais necessários ao desenvolvimento das plantas são fornecidos através da água, diluídos em uma solução nutritiva balanceada às suas necessidades nutricionais. (DOUGLAS, 1987).







2.2.2 Desenvolvimento histórico








Fonte: Elaborado polo autor.

2.2.3 Principais vantagens e desvantagens da produção hidropônica

O sistema de cultivo hidropônico apresenta uma série de vantagens que revolucionam a tradicional prática agrícola. Como uma grande economia de água, atingindo uma redução de até 95% em comparação com os métodos convencionais, essa técnica proporciona não apenas eficiência hídrica, mas também um controle mais preciso dos componentes nutritivos, resultando em condições nutricionais ideais para o crescimento das plantas. Além disso, a capacidade de implementação em regiões com escassez de terras cultiváveis abre portas para uma agricultura mais sustentável e acessível. Com uma lista abrangente de benefícios, desde a maximização da produtividade por área plantada até a colheita durante todo o ano, o sistema hidropônico se destaca como uma solução promissora para enfrentar os desafios agrícolas contemporâneos. No entanto, é essencial reconhecer suas desvantagens, como o custo inicial elevado, os cuidados específicos necessários para evitar doenças e os desafios nutricionais complexos que podem surgir. Neste contexto, explorar o potencial do cultivo hidropônico implica ponderar cuidadosamente esses aspectos, considerando tanto suas vantagens inegáveis quanto os desafios que demandam atenção.

 Vantagens		
	Ambientais:	<ul style="list-style-type: none"> • maior economia de água (até 95% menor que no sistema convencional); • mínimo ou nenhum uso de agrotóxicos; • maior produtividade por área plantada;
	Econômicas:	<ul style="list-style-type: none"> • redução dos períodos de crescimento das plantas; • menor dependência das condições climáticas; • colheitas durante todo o ano (evitando a sazonalidade); • alta produtividade, maior densidade populacional; • redução de custos de produção;
	Operacionais:	<ul style="list-style-type: none"> • possibilidade de utilização em regiões com carência de terras cultiváveis; • redução do estresse em plantas devido ao déficit hídrico; • possibilidade de implementação em pequenas áreas; • possibilidade de automação do manejo; • maior limpeza e higiene no ambiente produtivo; • possibilidade de rastreamento do alimento desde a produção até sua aquisição pelo consumidor final; • melhor ergonomia para os trabalhadores;
	Nutricionais:	<ul style="list-style-type: none"> • controle mais eficiente dos componentes nutritivos; • melhores condições nutricionais para as plantas;
	Qualitativas:	<ul style="list-style-type: none"> • uniformidade das plantas; • maior durabilidade das plantas na pós-colheita; • menor incidência de insetos prejudiciais ao crescimento;

 Desvantagens		
	Econômicas:	<ul style="list-style-type: none"> • custo inicial de implantação;
	Operacionais:	<ul style="list-style-type: none"> • necessidade de mão-de-obra qualificada;
	Manejo:	<ul style="list-style-type: none"> • cuidados especiais com algumas enfermidades, como Fusarium e Verticillium;
	Nutricionais:	<ul style="list-style-type: none"> • atenção aos problemas nutricionais complexos.
<p>"Essas desvantagens, podem ser contornadas com o uso de soluções nutritivas balanceadas, para as diversas fases de crescimento vegetal e com o uso de variedades resistentes." (MARTINEZ et al., 2002).</p>		

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.4 Sistemas de produção hidropônica

Os sistemas hidropônicos de produção são classificados de acordo com a forma de cultivo, materiais, equipamentos e condições utilizadas. São basicamente divididos em dois grupos: os Sistemas Passivos, onde a solução hidropônica permanece estática, sendo conduzida às raízes por meio de cultura com alta capilaridade, geralmente ligado a um pavio e os Sistemas Ativos, onde é necessária uma bomba para a circulação dos nutrientes e em grande parte deles, um sistema paralelo para a aeração da solução (FURLANI et. al., 1999). Todos os sistemas existentes são derivados ou a junção de oito sistemas básicos. O sistema NFT (Nutrient Film Technique) é o sistema predominante no Brasil, utilizado por cerca de 90% dos produtores. Surgiu uma discussão recentemente sobre a importância de encontrar uma alternativa ao sistema NFT. Nesse cenário, o sistema Floating ou Deep Film Technique (DFT) emerge como uma opção promissora para produtores que enfrentam interrupções no fornecimento de água e energia (SILVA et al., 2016).

2.2.5 Necessidades nutricionais das plantas

A composição de uma solução nutritiva deve levar em conta não somente as concentrações dos nutrientes, mas também as relações existentes entre os nutrientes, bem como outros fatores ligados ao cultivo, como o sistema hidropônico utilizado, fatores ambientais, estação do ano, o estágio fenológico, a espécie vegetal e o cultivar em produção. (FURLANI et. al., 1999). Cada espécie vegetal tem um potencial de exigência nutricional, não sendo possível determinar uma solução ideal para todas as espécies vegetais e condições de cultivo. (TEIXEIRA, 1996).

2.2.6 Técnicas atuais de produção

Para a maioria das hortaliças, o pH deve estar ajustado entre 5,5 e 6,5. Quando o pH está alto (acima de 6,5), geralmente é adicionada uma solução ácida para a sua correção (ácido nítrico, ácido fosfórico, ácido bórico etc.). Quando o pH está baixo (abaixo de 5,5) é adicionada uma substância alcalina (bicarbonato de sódio, cal virgem, hidróxido de sódio etc.). Eventualmente são utilizados kits reguladores pH-Up (Hidróxido de Potássio) ou pH-Down (Ácido Fosfórico) que seguem o mesmo princípio citado acima (ALIPIO, 2019). A condutividade elétrica (EC) para a maioria das culturas deve ser ajustada entre 0,5 e 1,2 mS/cm. Geralmente os produtores ajustam esses valores acrescentando nutrientes à solução quando a EC está baixa pois com o aumento de sais à solução, consequentemente a EC também aumenta, ou aumentando o volume de água do reservatório, diminuindo a concentração de sais, para baixar o valor da EC (FURLANI, 1999).

2.2.7 Função dos nutrientes em hidroponia

Os sistemas hidropônicos são menos tolerantes a variações nutricionais que os sistemas baseados em solo e estes podem resultar em sintomas na planta rapidamente, tanto pela carência quanto pelo excesso de nutrientes. Por esse motivo, a composição e o monitoramento regular da solução nutritiva devem ser observados com atenção. Vários elementos são indispensáveis para o crescimento das plantas (Tabela 1), e segundo Alberoni (1998), entre eles, existe uma divisão, conforme sua origem:

Orgânicos: Carbono (C), Hidrogênio (H), Oxigênio (O)

Minerais:

- Macro nutrientes: Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Enxofre (S);
- Micro nutrientes: Manganês (Mn), Ferro (Fe), Boro (B), Zinco (Zn), Cobre (Cu), Molibdênio (Mo), Cloro (Cl).

A divisão entre macro e micro nutrientes, considera as faixas de concentração de elementos minerais essenciais que as plantas exigem para a síntese de cada nutriente durante o seu ciclo (Tabela 2).

2.2.8 Influência dos fatores externos

Além da composição química e concentrações dos nutrientes disponibilizados na solução nutritiva, outros fatores externos influenciam o desenvolvimento das plantas e podem ser monitorados e corrigidos com a utilização de dispositivos específicos.

Esses fatores podem ser climáticos e ambientais como temperatura, umidade relativa do ar e radiação solar, bem como fatores físico-químicos como potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (EC), total de sólidos dissolvidos (TDS), potencial osmótico (PO), oxigênio dissolvido (OD) e potencial de oxidação/redução (ORP).

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada na pesquisa, de modo geral, foi um estudo descritivo e exploratório, com análise dos dados obtidos por meio de uma abordagem qualitativa-quantitativa, adequando os métodos utilizados às especificidades requeridas em cada etapa:

✓ **Prospecção Tecnológica:** análise quantitativa de estudos prospectivos realizados em três bases de dados de patentes internacionais comparando-os com o tema proposto;

✓ **Ensaio laboratoriais:** estudos exploratórios e análises com abordagem qualitativa-quantitativa;

✓ **Ensaio de campo:** Quanto à modalidade da pesquisa: experimental, de campo; quanto ao objetivo da pesquisa: descritiva; quanto à forma de abordagem: qualitativa,

✓ **Modelo de aprendizado de máquina:** método de aprendizado supervisionado, dividindo os dados em grupos de treino e teste e aplicação de algoritmos de classificação e regressão.

A estruturação da pesquisa foi concebida por intermédio da formulação da matriz de amarração proposta por Mazzon (2018).

Matriz de amarração

Problema da pesquisa (1)	Questões motivadoras (2)	Objetivo Geral (3)	Objetivos Específicos (4)	Metodologia (5)	Coleta de Dados (6)	Referencial Teórico (7)	Ensaio de Campo (8)	Ensaio Laboratoriais (9)
Como os indicadores de fatores externos (pH, EC, TDS, DO, temperatura, salinidade) estão correlacionados com as concentrações de micro e macro nutrientes presentes nas soluções nutritivas utilizadas em hidroponia?	A) Obtenção de informações imediatas sobre o conteúdo da solução nutritiva;	Desenvolver um método de controle da solução nutritiva para o cultivo hidropônico, baseado em algoritmos de Inteligência Artificial (IA), adequando as reposições de micro e macro nutrientes e manutenção dos fatores externos, às necessidades nutricionais reais das plantas, de forma gradativa e racional, visando a diminuição dos custos de produção, ganhos de produtividade e nutricionais.	A) Mensurar a influência do método de produção proposto, quanto aos ganhos de produtividade (massa verde produzida/m ²), quando comparado aos métodos convencionais de produção;	Estudo descritivo e exploratório (6, 8, 9);	A) Resultado das Análises físico-químicas das substâncias (9-B);	A) Formulação da hipótese e levantamento do material necessário para o seu desenvolvimento;	A) Preparação das instalações físicas (estufa, tanques, bancadas testemunha e objeto de estudo);	A) Determinação das faixas de concentração dos elementos minerais essenciais;
	B) Aumento de produtividade;				B) Resultado das Análises espectrométricas das amostras (9-C);		B) Seleção e aquisição das sementes e fertilizantes;	B) Análise físico-química das substâncias;
	C) Diminuição dos custos de produção com fertilizantes;		B) Comparar a utilização das substâncias nutritivas com os formulados comerciais e o impacto gerado nos custos de produção com fertilizantes;	Análise de dados com abordagem qualitativa / quantitativa (8, 9);	C) Resultados dos valores obtidos pelas curvas de calibração (9-E);	B) Avaliação abrangente da literatura especializada;	C) Preparação dos dispositivos de coleta de dados, câmeras, sensores, micro controladores;	C) Análise espectrofotométrica das amostras;
	D) Melhoria do conteúdo nutricional das plantas produzidas;				D) Dataset dos dados históricos das análises de soluções nutritivas fornecidos pelo IAC (7);		D) Desenvolvimento do software de tratamento, configuração do Banco de Dados (BD);	D) Análise dos coeficientes de desvio padrão para pH, EC e DO;
	E) Aplicação de algoritmos de IA na resolução do problema;		C) Determinar os ganhos nutricionais obtidos pelo método de produção proposto aos obtidos pelos métodos convencionais de produção.	Prospecção tecnológica em bases internacionais de patentes;	E) Dados obtidos pelo modelo de aprendizado de máquina e suas correlações com dataset do IAC (6-D)	C) Elaboração do plano de sustentação argumentativo sobre o tema abordado;	E) Aferição dos dados de produtividade (medição, pesagem, análise nutricional) das plantas colhidas;	E) Cálculo das curvas de calibração das amostras;
	F) Inovação tecnológica;				F) Resultados obtidos pelo ensaio de campo (8)		F) Transcrição dos resultados (8-E), e leituras do BD para planilhas; confecção de gráficos;	F) Determinação da variação dos fatores externos em diferentes concentrações;
AMARRAÇÃO:	(1)	(2)	(3)	(3 e 4)	(5)	(4 e 6)	(7)	(7)

Fonte: Adaptado de Mazzon (2018)

Observações: IAC (Instituto Agrônomo de Campinas/SP), pH (Potencial Hidrogeniônico), EC (Eletro Condutividade), TDS (Total de Sólidos Dissolvidos), DO (Oxigênio Dissolvido)

3.1 Ensaios Laboratoriais

Os Ensaios Laboratoriais ocorreram em um dos laboratórios do Instituto de Química da Universidade Federal da Bahia/UFBA, sobre a supervisão do co-orientador, onde foram efetuadas cálculos molares e as análises das amostras de fertilizantes minerais, em diferentes concentrações (20%, 40%, 60%, 80% e 100%) e com os resultados destas análises foram calculadas as respectivas curvas de calibração. Os dados obtidos com o resultado deste Ensaio, foram utilizados como referência para averiguação e controle do modelo de aprendizado de máquina supervisionado, utilizado pela IA do sistema proposto para a posterior identificação quantitativa dos fertilizantes analisados.

3.2 Ensaio de Campo

Objetivo: Mensurar as variações de produtividade e nutricionais de um sistema hidropônico em ambiente real de produção;

Monitoramento:

- ✓ Bancada “objeto de estudo”: foram repostos os nutrientes utilizando o método aqui proposto, de acordo com as necessidades nutricionais das cultivares;
- ✓ Bancada “testemunha”: Manejo convencional, os nutrientes foram adicionados em duas etapas distintas e repostos eventualmente;

Instalações físicas: O experimento ocorreu nas dependências da Fazenda Verdureira, no município de São Roque/SP, em uma estufa hidropônica com duas bancadas, cada uma delas contendo 14 perfis (de 55 furos por perfil, com distanciamento entre os furos de 20cm) perfazendo 770 furos por bancada, e estas interligadas individualmente ao seu tanque de nutrientes respectivo, ambos abastecidos com 220 litros de água, com o seu pH corrigido para 5.5. Cada um dos tanques, conectado à sua respectiva bancada, foi equipado com um dispositivo de monitoramento remoto, configurado para enviar as leituras de pH, EC, Temperatura, Salinidade, OD e TDS a cada 5 minutos.

Cultivar / Sementes: Entre as cultivares analisadas foi selecionada para o teste a Alface Crespa BS AC0055 da Blueseeds®, pela resistência ao Míldio, LMV e queima de borda, rusticidade e adaptação às condições tropicais de cultivo e por já ser produzida pela Fazenda, facilitando o manejo.

Semeadura / Germinação: Foram selecionadas sementes oriundas do mesmo fornecedor/lote, que foram distribuídas em bandejas de espuma fenólica previamente lavadas, irrigadas com água por um pulverizador e colocadas para a germinação em local apropriado (temperatura controlada entre 20 °C e 25 °C), até que se completasse a germinação das mudas.

Viveiros / Berçário: Uma vez completada a etapa de germinação, as mudas germinadas foram transferidas para a estufa e acomodadas em local com iluminação plena, onde foi iniciada a subirrigação com solução nutritiva diluída em 50%, tomando-se o cuidado de manter a espuma sempre úmida. Quando as sementes iniciaram a emissão das primeiras folhas verdadeiras (7 dias após a semeadura), foi efetuado o transplante das células de espuma para as canaletas das bancadas testemunha e objeto de estudo.

Preparação da bancada 1 (testemunha): Para efeito de controle foi feita uma análise inicial da água do tanque de alimentação de substratos conectado à bancada 1 (tanque 1) e após corrigido o pH inicial para 5,5, foi aferida a condutividade (EC), temperatura (oC), salinidade total (ppm) e oxigênio dissolvido (OD). Foi adicionado a ele 0,5 Kg do formulado Aquafértil 15-11-34+Mg, solução para alface da Agrivalor Fertilizantes Especiais®, utilizado habitualmente pela Fazenda para esta cultivar.

Preparação da bancada 2 (objeto de estudo): Também para efeito de controle, no tanque 2 foi procedida a mesma análise inicial feita no tanque 1, a mesma correção de pH inicial, aferidos os mesmos fatores externos e adicionada a solução nutritiva elaborada seguindo as recomendações nutricionais de vários autores para esta cultivar.

Infográfico do Ensaio de campo

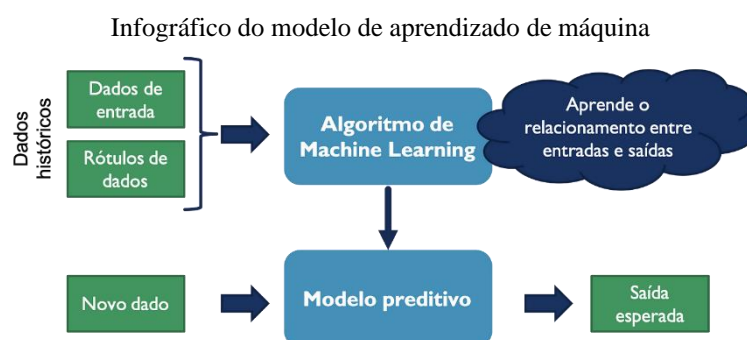


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Modelo de Aprendizado de Máquina

O processo de desenvolvimento do modelo de aprendizado de máquina foi baseado nos dados disponibilizado pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), contendo a série histórica de diversos resultados de análises de soluções nutritivas efetuadas. O exemplo de relatório de saída do modelo revelou não apenas o desempenho superior do modelo, mas também evidenciou a eficácia dos métodos utilizados para lidar com a limpeza e a preparação dos dados. A aplicação do software para tratamento e eliminação de outliers não só refinou o conjunto de dados, mas também destacou a importância de considerar e mitigar a presença de valores atípicos que podem impactar significativamente a precisão das previsões.

O infográfico do modelo de aprendizado de máquina, além de proporcionar uma representação visual clara do processo, destaca a complexidade das etapas envolvidas, desde a coleta dos dados até a aplicação dos algoritmos e a avaliação dos resultados. Essa ferramenta gráfica não apenas comunica efetivamente os detalhes técnicos, mas também serve como um meio eficaz para apresentar o valor prático do modelo proposto.



Fonte: ESCOVEDO & KOSHIYAMA (2020)

A série histórica abrange uma gama diversificada de resultados de análises laboratoriais de soluções nutritivas, consolidando-se como uma fonte valiosa de informações. Os campos variados, como data da coleta da amostra, temperatura, pH, EC, TDS, OD e salinidade, junto com os resultados detalhados das análises laboratoriais (macro e micro nutrientes), proporcionaram uma base sólida e abrangente para o desenvolvimento do modelo.

Dataset utilizado pelo modelo de aprendizado de máquina

Id	Data	Temp.	pH	EC	TDS	OD	Sal.
1	01/01/2020	20,91	6,55	0,125	93,90	129,98	0,05
2	02/01/2020	23,66	6,35	3,945	2958,45	111,59	2,08
3	03/01/2020	28,52	6,38	3,394	2545,58	86,49	1,76
4	04/01/2020	30,51	6,35	1,738	1303,17	97,34	0,85
5	05/01/2020	25,56	5,93	1,268	950,74	67,18	0,60
...
1224	27/06/2023	35,41	6,51	0,677	508,04	33,32	0,31
1225	28/06/2023	26,75	5,12	0,375	280,95	28,63	0,16
1226	29/06/2023	30,95	6,52	2,297	1723,12	113,42	1,15
1227	30/06/2023	28,79	5,49	2,613	1959,66	73,64	1,33
1228	30/06/2023	25,66	5,85	3,030	2272,85	69,12	1,56

Fonte: IAC – Instituto agrônomo de Campinas

A etapa subsequente, envolvendo os resultados obtidos nos Ensaios Laboratoriais e análises físico-químicas das substâncias, desencadeou a criação de um software especializado. Esse software não apenas tratou os dados, mas também eliminou outliers, proporcionando uma base de dados mais refinada. A análise exploratória, seguida pela limpeza dos dados e construção da Matriz de Correlação, adicionou profundidade à compreensão das inter-relações entre as variáveis, facilitando a estratificação eficiente dos dados em conjuntos de teste e treino.

O modelo gerado a partir do conjunto de dados contendo os atributos criados demonstrou um desempenho melhor, tanto durante a fase de validação como nos testes. Assim, os resultados reforçam a hipótese de que a inclusão dos atributos propostos contribui para a melhoria na precisão das previsões no contexto do aprendizado supervisionado.

A implementação bem-sucedida do algoritmo de classificação e regressão marcou um avanço significativo na modelagem preditiva. O relatório de saída do modelo reflete um desempenho notavelmente superior durante a fase de validação e nos testes subsequentes. Esses resultados substanciam a hipótese inicial de que a inclusão dos atributos propostos desempenhou um papel crucial na melhoria da precisão das previsões, solidificando a utilidade do modelo no contexto do aprendizado supervisionado.

Exemplo de relatório de saída do Modelo

Id	Entradas							Saídas															
	Temp.	pH	EC	TDS	OD	Sal.	EC ₁₅	Macronutrientes						Micronutrientes									
								N	P	K	Ca	S	Mg	B	Cl	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Si	Na	Zn
1	18,00	3,50	2,235	1564,18	90,90	1,32	2,598	227,82	30,06	189,09	138,31	47,52	46,45	0,2484	2,0741	0,0127	2,4273	0,6039	0,0708	0,0906	0,0683	5,2895	0,2992
2	17,87	3,60	2,500	1750,29	104,73	1,49	2,916	194,41	33,84	199,21	162,59	74,31	64,51	0,3331	1,7022	0,0474	3,6895	0,5610	0,0326	0,0496	0,0871	5,8688	0,7738
3	20,69	4,00	2,478	1734,52	82,73	1,38	2,712	243,77	35,30	255,03	173,21	65,00	59,74	0,3951	1,4066	0,0269	3,8774	0,5126	0,0340	0,0476	0,0660	4,9810	1,5900
4	22,42	4,20	2,466	1725,89	72,39	1,32	2,600	285,66	36,18	227,28	181,94	35,64	49,28	0,3337	1,8372	0,0712	2,0519	0,4430	0,0738	0,0843	0,1061	2,5778	1,1817
5	20,74	4,30	2,028	1419,27	67,46	1,11	2,216	170,38	25,33	196,28	134,21	71,96	47,30	0,3454	2,0947	0,0319	2,6849	0,6357	0,0261	0,0971	0,1193	1,8313	0,3507
6	20,28	4,40	1,583	1108,15	53,91	0,86	1,748	125,64	22,29	138,67	94,67	46,38	47,74	0,3763	1,5946	0,0753	3,5325	0,6065	0,0643	0,0976	0,0682	5,3154	0,2785
7	20,43	4,40	1,705	1193,61	57,73	0,93	1,877	131,46	23,60	150,43	106,67	51,97	53,79	0,4091	1,8591	0,0414	3,0670	0,5384	0,0220	0,0871	0,1165	5,3029	0,4851
8	21,99	4,50	1,992	1394,61	60,41	1,06	2,120	186,21	28,52	180,63	134,17	72,41	51,62	0,3984	2,0384	0,0412	2,3452	0,5326	0,0324	0,0741	0,0938	2,8566	0,8172
9	18,93	4,60	0,946	662,28	35,29	0,51	1,077	18,83	8,93	79,93	46,55	65,46	31,45	0,2972	1,4225	0,0767	2,8256	0,4959	0,0970	0,0757	0,0774	5,2095	0,4545
10	21,33	4,74	1,063	744,12	32,65	0,54	1,147	106,25	14,65	67,72	58,70	37,56	26,32	0,4210	1,8327	0,0366	3,5472	0,6382	0,0676	0,0760	0,1090	4,4365	0,3372

Fonte: Elaborado pelo autor.

O índice de acurácia de predições, medido pelo RMSE (erro quadrático médio), atingindo aproximadamente 92%, é um indicativo positivo do desempenho do modelo. No entanto, a abertura para melhorias é reconhecida, com a sugestão de que a aplicação de um dataset mais amplo, contendo mais registros, e de qualidade superior, com uma redução ainda maior de outliers, poderia elevar ainda mais a eficácia do modelo.

Em suma, os resultados obtidos até o momento validam a implementação do modelo proposto, oferecendo insights valiosos para aprimorar práticas agrônômicas. Essa abordagem inovadora, ancorada em dados de alta qualidade e processamento avançado, promete contribuir significativamente para o campo da análise de soluções nutritivas e estabelece uma base sólida para futuras investigações e aplicações práticas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Custos de produção

Os custos de produção hidropônica podem variar significativamente dependendo de diversos fatores, incluindo o tipo de cultivo, a escala da operação, a localização geográfica e a eficiência na gestão. Portanto, os percentuais exatos podem variar consideravelmente (MATIOLI et. al., 1997). No entanto, os principais custos na produção hidropônica em uma estimativa geral em relação aos custos totais são:



Fonte: Adaptado, Embrapa Semiárido (CPATSA), 2022

Conforme o gráfico acima, o custo com fertilizantes chega a representar 30% (trinta por cento) dos custos totais de produção hidropônica. Isso ocorre pelo fato dos fertilizantes empregados no manejo convencional agregarem aos seus preços, os royalties de suas marcas, encargos tributários e elevadas margens de lucro, encarecendo-os significativamente.

Após pesquisar os principais fertilizantes utilizados pelos produtores e quantificar os custos das substâncias anunciadas pelos fabricantes (garantias) e suas concentrações, foi orçado no mercado varejista os preços dessas substâncias e calculado o valor necessário para a confecção desses produtos com as mesmas concentrações.

4.2 Análise da Produtividade

Foram analisados diferentes parâmetros de produtividade, considerando os tamanhos, quantidade de folhas, pesos totais e individuais de massa verde e seca das plantas colhidas.

A colheita foi feita no 42º dia após o plantio, quando se deu o ponto de maturação, em ambas as bancadas. No mesmo dia, as amostras foram enviadas ao Laboratório de Fitopatologia, para efetuar as medições e pesagens. Posteriormente, as plantas foram mantidas em estufa em temperatura de 60° por 72 horas, quando foi medido o peso seco das amostras.

Os valores totais de “Massa fresca/bancada” e “Massa seca/bancada” foram obtidos como produto dos pesos frescos e secos individuais pela quantidade de furos por bancada, convertendo os resultados de gramas para quilos.

Foi considerado como “Incidência de moléstias” os casos observados de pragas e/ou doenças de caráter biótico, havendo em ambas as bancadas poucas ocorrências.

A “Perda de líquido das plantas” foi calculada pela diferença percentual entre a massa fresca e a massa seca.

Gráfico comparativo de produtividade

Parâmetro	Bancada testemunha	Bancada de estudo	Diferença (%)
Massa fresca/bancada (kg)	157,28	202,10	28,50
Massa seca/bancada (kg)	39,43	50,67	28,49
Incidência de moléstias (%)	6,45	4,52	-29,92
Peso fresco individual (g)	204,26	262,47	28,50
Peso seco individual (g)	51,21	65,80	28,49
Tamanho da maior folha (cm)	16,70	18,50	10,78
Folhas por planta (unid.)	12,30	14,80	20,33
Produção de massa fresca (kg/m ²)	5,11	6,56	28,50
Produção de massa seca (kg/m ²)	1,28	1,65	28,49
Composição de massa seca (%)	20,05	20,24	0,95
Perda de líquido das plantas (%)	79,95	79,96	0,00

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 Análises nutricionais

A alface se destaca na alimentação e na promoção da saúde humana devido à sua riqueza em vitaminas e minerais, sendo a folha verde mais popularmente consumida. Ela é geralmente apreciada in natura e, nessas condições, apresenta a seguinte média de composição a cada 100g: conteúdo de água de 94%, valor calórico de 18 Kcal, 1,3 g de proteína, 0,3 g de extrato etéreo, 3,5 g de carboidratos totais, 0,7 g de fibra, 68 mg de cálcio, 27 mg de fósforo, 1,4 mg de ferro, 264 mg de potássio, 0,05 mg de tiamina, 0,08 mg de riboflavina, 0,4 mg de niacina e 18,0 mg de vitamina C (OHSE et al., 2001).

Quantidade por porção

Nutriente	Bancada testemunha		Bancada de estudo	
	Peso individual (g): 255,47		Peso individual (g): 416,39	
	Qtd.	% VD*	Qtd.	% VD*
Valor energético	27.3kcal=45	1%	44.5kcal=45	2%
Carboidratos	4,3g	1%	7,1g	2%
Proteínas	3,5g	5%	5,6g	7%
Fibra alimentar	4,7g	19%	7,6g	30%
Cálcio	97,0mg	10%	158,1mg	16%
Vitamina C	39,8mg	88%	64,9mg	144%
Fósforo	65,9mg	9%	107,5mg	15%
Manganês	0,5mg	22%	0,8mg	35%
Magnésio	28,0mg	11%	45,7mg	18%
Lipídios	0,4g	-	0,7g	-
Ferro	1,0mg	7%	1,7mg	12%
Potássio	682,4mg	-	1112,3mg	-
Cobre	0,1ug	0%	0,1ug	0%
Zinco	0,6mg	9%	1,0mg	14%
Niacina	2,8mg	16%	4,5mg	25%
Tiamina B1	0,3mg	21%	0,5mg	36%
Riboflavina B2	0,3mg	23%	0,5mg	38%
Sódio	8,6mg	0%	14,1mg	1%

* % Valores diários com base em uma dieta de 2.000 Kcal ou 8.400kj. Seus valores diários podem ser maiores ou menores dependendo de suas necessidades.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela Nutricional

Nutriente	Bancada testemunha		Bancada de estudo	
	Peso individual (g): 255,47		Peso individual (g): 416,39	
	Qtd.	% VD*	Qtd.	% VD*
Calorias (valor energético)	2810.17 kcal	140.51%	4580.29 kcal	229.01%
Carboidratos líquidos**	0.00 g	-	0.00 g	-
Carboidratos	434.30 g	144.77%	707.86 g	235.95%
Proteínas	332.11 g	110.70%	541.31 g	180.44%
Gorduras totais	51.09 g	92.90%	83.28 g	151.41%
Gorduras saturadas	0.00 g	0.00%	0.00 g	0.00%
Fibra alimentar	459.85 g	1839.38%	749.50 g	2998.01%
Sódio	766.41 mg	31.93%	1249.17 mg	52.05%

* % Valores Diários de referência com base em uma dieta de 2.000 kcal ou 8400 kJ. Seus valores diários podem ser maiores ou menores dependendo de suas necessidades energéticas.

** Carboidratos líquidos são aqueles que o corpo consegue digerir e, geralmente, não incluem as fibras.

Fonte: Elaborada pelo autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ficou demonstrado nos resultados dos ensaios realizados que as aplicações do sistema proposto são diversas e pode ser utilizado para diferentes tipos de cultivos e em diferentes escalas de produção, e que sua implementação reduz os custos com fertilizantes e água, permite melhor controle sobre as condições ambientais de cultivo, além de maior produtividade (massa verde/m²) e qualidade nutricional dos alimentos produzidos.

Ao final do experimento foram comparados os ganhos de massa verde e massa seca produzidos; dimensões, qualidade e quantidade de folhas; incidência de moléstias e valores nutricionais de amostras de ambas as bancadas.

Análise dos custos de produção: As diferenças percentuais encontradas mostram uma diminuição de custo entre o Preço de Venda dos formulados comerciais e o custo com a utilização das substâncias entre 47,55% e 92,76%. Este modelo já foi adotado pela Empresa Demandante e está em uso deste outubro/2022 demonstrando uma diminuição de custos com fertilizantes de cerca de 76%.

Análise da produtividade: Os resultados da análise de produtividade mostraram uma diferença significativa (cerca de 28,5%) de ganho de produtividade com a utilização do método proposto em comparação ao manejo convencional de produção hidropônica.

Análise nutricional: A análise efetuada demonstra ganhos nutricionais com a utilização do método proposto, embora ainda não seja definitiva, visto que a abordagem considerada para se chegar aos resultados levou em conta apenas as concentrações de nutrientes em relação aos pesos específicos produzidos. Se faz necessário a realização de análises mais detalhadas, em diferentes cultivares, para validar os ganhos nutricionais identificados, considerando variáveis específicas e interações bioquímicas.

6 PESQUISAS FUTURAS

Com base nas conclusões obtidas nas diferentes fases da pesquisa, foram identificadas diversas áreas que demandam investigações futuras a fim de aprimorar e consolidar os resultados alcançados. Essas pesquisas visam ampliar o entendimento sobre a viabilidade e eficácia da solução proposta, bem como otimizar os processos envolvidos:

- ✓ Monitoramento de longo prazo: Acompanhamento a longo prazo da implementação da solução, visando avaliar a sustentabilidade e eficácia contínua, adaptando a técnica às mudanças nas condições operacionais e ambientais.

- ✓ Investigação das variáveis na produtividade: Pesquisa adicional para compreender melhor as variáveis que contribuem para o ganho significativo de produtividade identificado, como análises detalhadas das condições de cultivo e características genéticas das plantas;

- ✓ Aprimoramento do Modelo de Aprendizado de Máquina: Implementar Datasets com uma maior quantidade de registros e comparar a eficácia do modelo proposto com outros algoritmos de classificação/regressão.

Essas pesquisas futuras contribuirão para fortalecer as bases científicas da solução proposta, garantindo sua inovação, eficácia e sustentabilidade a longo prazo.

REFERÊNCIAS

- ALIPIO, M. I., DELA CRUZ, A. E. M., DORIA, J. D. A., FRUTO, R. M. S. On the design of Nutrient Film Technique hydroponics farm for smart agriculture. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, [s.l.], v.12, n.3, p. 315-324, 2019.
<http://dx.doi:10.1016/j.eaef.2019.02.008>.
- ANUÁRIO. Anuário Brasil Hidroponia. 1.ed. Novo Hamburgo: Revista Hidroponia, 2018. 152p.
- DOUGLAS, James Sholto. Hidroponia: Cultura sem terra. São Paulo: Nobel, 1987.
- ESCOVEDO, Tatiana., KOSHIYAMA, Adriano. Introdução a Data Science: Algoritmos de Machine Learning e métodos de análise. São Paulo: Casa do Código, 2020
- FURLANI, P. R.; Instruções para o cultivo de hortaliças de folhas pela técnica de hidroponia - NFT. Campinas: Instituto Agrônomo, 1997. Boletim técnico, 168. 30 p.
- FURLANI, P. R., SILVEIRA, L. C. P.; BOLONHEZI, D.; FAQUIM, V. Cultivo hidropônico de plantas. Campinas: Instituto Agrônomo, 1999. 52p. (Boletim Técnico, 180)
- GUEDES, Í. M. R. (2020). Hidroponia: de metodologia de pesquisa a sistema de produção. Disponível em: <https://www.tecnoponia.com/2020/02/hidroponia-de-metodologia-de-pesquisa.html>. Acessado em 20/02/2022.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.
- MALAVOLTA, E. Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo. Ceres. 2006.
- MAZZON, J. A. Using the Methodological Association Matrix in Marketing Studies. *Revista Brasileira de Marketing*, v. 17, n. 5, p. 747-770, 2018.
- MATIOLI, C. S.; PINTO, J. M.; FURLAN, R. A.; FOLEGATTI, M. V. Produção de alface hidropônica: um estudo de viabilidade técnico-econômica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26., 1997, Campina Grande, PB.
- SCHMIDT, C. A. P.; CARLET, M. A.; PAULA FILHO, P. L.; MARUJO, L.; SPANCERSKI, J. S.; Análise estatística do processo de produção de alfaces hidropônicas com base em dados coletados por sensores. In: IX CONBREPRO, 2019, Ponta Grossa. Engenharia na Indústria da Bebida, 2019.
- SILVA, M. G.; Frequency of recirculation of nutrient solution in hydroponic cultivation of coriander with brackish water. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 20, p. 447-454, 2016.
- TEIXEIRA, N. T. Hidroponia: Uma alternativa para pequenas áreas. Guaíba: Agropecuária, 1996. 86p.